不同中性洗涤纤维与非纤维性碳水化合物比值饲粮对肉用绵羊甲烷排放的影响

丁静美[1,2]　邓凯东[3]　张明娇[4]　刁其玉[2]　屠　焰[2*]　成述儒[1*]

（1.甘肃农业大学动物科学技术学院，兰州 730070；2.中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点试验室，北京 100081；3.金陵科技学院动物科学与技术学院，南京 210038；4.北京农学院动物科技学院，北京 102206）

摘　要:本试验旨在研究不同中性洗涤纤维（NDF）与非纤维性碳水化合物（NFC）比值(NDF/NFC)饲粮对肉用绵羊甲烷排放的影响。试验采用4×4完全拉丁方试验设计，将16只杜泊×小尾寒羊杂交羯羊随机分成4组，每组4只，按维持水平饲喂NDF/NFC分别为3.02（饲粮1）、2.32（饲粮2）、1.58（饲粮3）、1.04（饲粮4）的全混合颗粒饲粮（玉米秸秆为粗饲料来源）。试验共进行4期，每期18 d，包括3 d的调整期、7 d的预试期和8 d的正试期，在正试期内测定甲烷产量、饲粮总能和营养物质表观消化率。结果表明：饲粮2的甲烷日排放量显著高于饲粮3和4（43.43 L/d vs. 38.88和35.98 L/d；*P*<0.05）。与饲粮1相比，饲粮2和3的每千克干物质采食量（DMI）甲烷排放量显著增加（38.00 L/kg DMI vs. 42.24、41.69 L/kg DMI；*P*<0.05），但是饲粮2、3和4之间差异不显著（*P*>0.05）。随着NDF/NFC的降低，每千克可消化有机物（DOM）的甲烷排放量逐渐降低，饲粮4的每千克DOM的甲烷排放量显著低于饲粮1、2和3（58.78 L/kg DOM vs. 75.00、73.35和64.11 L/kg DOM；*P*<0.05）。随着NDF/NFC的降低，每千克中性洗涤纤维采食量（NDFI）或酸性洗涤纤维采食量（ADFI）的甲烷排放量逐渐增加，且各饲粮之间差异显著（*P*<0.05）。综上所述，结合各营养物质表观消化率和甲烷排放效率，在维持水平下，采用NDF/NFC为1.04的玉米秸秆饲粮作为肉用绵羊甲烷减排的饲粮最合适。

关键词：肉用绵羊；NDF/NFC；甲烷排放；可消化有机物

中图分类号：S816　文献标识码：A　文章编号：

植物纤维经过瘤胃发酵产生甲烷，这不仅会降低饲粮能量的利用率，而且造成温室效应，

收稿日期：2016-09-20
基金项目：国家自然科学基金"绵羊甲烷排放的粪便反射特征光谱研究"（41475126）；国家科技支撑项目子课题"农区肉羊健康养殖模式构建与示范"（2012BAD3905-3）
作者简介：丁静美（1989-），女，河北邢台人，硕士研究生，从事动物遗传育种与繁殖研究。E-mail: 1114314949@qq.com
*通信作者：屠　焰，研究员，博士生导师，E-mail: tuyan@caas.cn；成述儒，副教授，硕士生导师，E-mail:　chengsr@gsau.edu.cn

引起全球变暖。通常奶牛有 6%～10%的饲粮总能以甲烷的形式排放至环境中[1]，肉羊则有8%～10%的饲粮总能转变为甲烷而损失掉[2-4]。每年全球反刍动物甲烷排放量占人为甲烷排放量的 33%，对温室效应的贡献率达到 15%～20%[5]。目前，对甲烷减排措施的研究主要集中于在饲粮中添加脂肪酸、天然植物及植物源性添加剂或者化学制剂等。但由于上述措施缺乏长效性或存在一定毒副作用，在生产中并未得到广泛应用[6]。对奶牛和肉牛的研究表明适当提高精料水平可以提高饲料的利用率，减少甲烷排放[7-9]，但精料水平对肉羊甲烷排放的影响报道很少。2014 年我国羊出栏量高达 3 亿只[10]，摸清肉羊甲烷排放规律，对发展环保、高效的肉羊养殖业至关重要。为此，本研究从生产角度出发，以玉米秸秆为粗饲料来源，研究在维持水平下，不同中性洗涤纤维（NDF）与非纤维性碳水化合物（NFC）比值（NDF/NFC）饲粮对肉用绵羊甲烷排放的影响，旨在为成年肉羊合理饲粮配方的配制及甲烷减排研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验动物

本试验于 2015 年 10 月至 2016 年 1 月在中国农业科学院昌平区南口中试基地完成。选用 16 只平均体重为（50.9±2.8） kg 的杜泊×小尾寒羊杂交羯羊，清晨空腹称重后，佩戴耳标和进行驱虫处理，然后随机分成 4 组，每组 4 只。

1.2 试验设计与饲粮

采用 4×4 完全拉丁方试验设计，共进行 4 期试验，每期试验中各组试验羊分别饲喂NDF/NFC 分别为 3.02（饲粮 1）、2.32（饲粮 2）、1.58（饲粮 3）、1.04（饲粮 4）的全混合颗粒饲粮。试验饲粮以玉米秸秆为粗饲料、玉米和豆粕为精饲料原料配制，其组成及营养水平见表 1。

4 期试验每期持续 18 d，包括 3 d 的调整期、7 d 的预试期和 8 d 的正试期。本试验在维持体重的情况下进行饲喂，在正式试验前，进行预试验，根据体重变化确定饲喂量。每日饲喂 2 次（07:30 和 16:30），自由饮水。在每期试验的调整期，试验羊于地面单圈独饲，开始饲喂对应的试验饲粮；预试期开始时，移入代谢笼，确定饲粮采食量，以及初始和结束体重，确定维持饲喂水平。

表 1　试验饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis) %

项目 Items	饲粮 Diets			
	1	2	3	4
原料 Ingredients				
玉米 Corn	10.20	18.70	27.50	36.30
豆粕 Soybean meal	7.20	13.30	19.50	25.70
玉米秸秆 Corn stalk	80.60	66.10	51.20	36.10
维生素预混料 Vitamin premix[1)]	0.04	0.04	0.04	0.04
矿物质预混料 Mineral premix[2)]	0.20	0.20	0.20	0.20
食盐 NaCl	0.50	0.50	0.50	0.50
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	0.80	0.60	0.40	0.50
石粉 Limestone	0.46	0.56	0.66	0.66
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[3)]				
干物质（风干基础）DM（air-dry basis）	93.56	92.90	92.15	92.41
有机物 OM	90.05	90.41	91.36	92.08
代谢能 ME/(MJ/kg)	7.20	8.23	9.51	10.12
粗蛋白质 CP	7.51	10.85	13.84	16.42
粗脂肪 EE	1.07	1.15	1.44	1.67
钙 Ca	0.69	0.68	0.68	0.68
磷 P	0.40	0.40	0.40	0.40
中性洗涤纤维 NDF	61.47	55.46	47.00	36.79
酸性洗涤纤维 ADF	36.60	31.38	27.47	21.78
非纤维性碳水化合物 NFC	20.36	23.90	29.80	35.37
中性洗涤纤维与非纤维性碳水化合物比值 NDF/NFC	3.02	2.32	1.58	1.04

1) 维生素预混料为每千克饲粮提供 Vitamin premix provided the following per kg of

experimental diets：VA 15 000 IU,VD 5 000 IU,VE 50 mg。

2)微量元素预混料为每千克饲粮提供 Mineral premix provided the following per kg of experimental diets:Fe 90 mg,Cu 12.5 mg,Mn 130 mg,Zn 100 mg,Se 0.3 mg,I 1.5 mg,Co 0.5 mg。

3)代谢能、非纤维性碳水化合物[非纤维性碳水化合物=100-(中性洗涤纤维+粗蛋白质+粗脂肪+粗灰分)[11]]为计算值，其他营养水平均为实测值。Nutrient levels were measured values except ME and NFC. ME and NFC were calculated values, and NFC=100-(NDF+CP+EE+ash)[11]。

1.3 消化代谢与气体代谢试验

每期试验的正试期采用全收粪尿法收集粪、尿。每天采集每只羊的饲粮和剩料样品，并称取和记录每只羊排粪量，按粪重的 10%采样，将每只羊 8 d 的粪样混合冷冻保存；用盛有 100 mL 的 10%（体积分数）H_2SO_4 的塑料桶收集尿液，每天测定并记录尿液体积，用自来水稀释至 5 L，再取 15 mL 尿样，将每只羊 8 d 的尿样混合冷冻保存。

在每期试验正试期的第 1、3、5、7 天，分 4 批（4 只 / 批，每组 1 只）将试验羊分别移入 4 个呼吸代谢室内，适应 24 h 后，采用气体代谢系统测定随后 24 h 内每只羊的甲烷、二氧化碳排放量（GGA，Los Gatos Research，California，美国）及氧气的消耗量（FC-10 氧气测定仪，Sable Systems International，Henderson，NV，美国）[5,12]。每只羊进入和离开呼吸代谢室时，均测定并记录体重。

1.4 样品分析

饲粮样和粪样在 65 ℃烘 48 h，回潮 24 h 后称重，测定初水分；随后测定其干物质（DM）、粗灰分（ash）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）含量[13]；通过氧弹式测热计(Parr 6400，Parr Instrument Co.，Moline，美国）测定总能（GE）[12]；测定 NDF 和酸性洗涤纤维（ADF）含量时，先用胰蛋白酶及淀粉酶对样品进行酶解，然后采用 Van Soest 等[14]的方法进行测定。尿样按同样方法测定氮含量和 GE。

1.5 统计分析

数据处理与分析采用 SPSS 19.0 统计分析软件中的一般线性模型分析。平均值的多重比较采用 Duncan 氏法进行，显著性水平为 P<0.05。

2 结　果

2.1　营养物质表观消化率和能量代谢

表 2 为以维持水平饲喂不同 NDF/NFC 饲粮对肉用绵羊的营养物质表观消化率的影响。随着 NDF/NFC 的降低，DM、OM、CP 表观消化率逐渐升高，各饲粮间差异均显著（P<0.05）。NDF 表观消化率随 NDF/NFC 的降低先升高后下降，饲粮 3 的 NDF 表观消化率显著高于饲粮 1、2（P<0.05），饲粮 4 与饲粮 2、3 之间差异不显著（P>0.05）。ADF 表观消化率随 NDF/NFC 的降低而升高，各饲粮间差异均显著（P<0.05）。

表 2　以维持水平饲喂不同 NDF/NFC 饲粮对肉用绵羊营养物质表观消化率的影响

Table 2　Effects of feeding different NDF/NFC diets on nutrient apparent digestibility of meat sheep at maintenance level

	饲粮 Diets					P 值 P-value	
项目 Items	1	2	3	4	SEM	**L**	Q
干物质 DM	1						
采食量 Intake/（g/d）	109.2^{a}	1 028.3^{b}	931.86^{c}	878.76^{d}	4.18	0.003	0.060
粪排泄量 Feces output/（g/d）	524.99^{a}	401.93^{b}	290.09^{c}	236.47^{d}	10.48	0.013	0.060
表观消化率							
Apparent digestibility/%	52.69^{d}	60.92^{c}	68.88^{b}	71.64^{a}	0.09	0.020	0.080
有机物 OM	1						
采食量 Intake/（g/d）	003.7^{a}	929.47^{b}	850.24^{c}	809.19^{d}	3.98	0.008	0.070
粪排泄量 Feces output/（g/d）	439.35^{a}	336.02^{b}	243.15^{c}	196.71^{d}	8.67	0.013	0.060
表观消化率							
Apparent digestibility/%	56.24^{d}	63.85^{c}	71.41^{b}	75.32^{a}	0.08	0.010	0.060
粗蛋白质 CP							
采食量 Intake/（g/d）	83.31^{a}	111.57^{b}	128.97^{c}	144.29^{d}	0.46	0.010	0.050
粪排泄量 Feces output/（g/d）	54.32^{a}	45.42^{b}	37.79^{c}	36.21^{c}	1.56	0.020	0.180
表观消化率							
Apparent digestibility/%	34.82^{d}	59.30^{c}	70.71^{b}	74.90^{a}	0.012	0.040	0.060

中性洗涤纤维 NDF							
采食量 Intake/（g/d）	681.87^{a}	570.28^{b}	437.97^{c}	323.30^{d}	2.36	0.001	0.030
粪排泄量 Feces output/（g/d）	338.86^{a}	256.61^{b}	184.06^{c}	140.37^{d}	6.49	0.009	0.028
表观消化率 Apparent digestibility/%	50.53^{c}	55.03^{b}	58.07^{a}	56.58^{ab}	1.35	0.043	0.120
酸性洗涤纤维 ADF							
采食量 Intake/（g/d）	405.99^{a}	322.67^{b}	255.98^{c}	191.39^{d}	3.27	0.002	0.020
粪排泄量 Feces output/（g/d）	187.97^{a}	137.65^{b}	96.37^{c}	62.53^{d}	3.24	0.004	0.004
表观消化率 Apparent digestibility/%	53.70^{d}	57.35^{c}	62.37^{b}	67.07^{a}	0.012	0.003	0.030

L 为线性关系，Q 为二次关系。同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。下表同。, The same as below.

L represented linear relationship and Q represented quadratic relationship. In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05). The same as below.

2.2 能量代谢

表 3 为以维持水平饲喂不同 NDF/NFC 饲粮对肉羊绵羊能量代谢的影响。随着 NDF/NFC 比值的降低，总能摄入量和粪能逐渐降低，尿能逐渐增加，总能表观消化率和代谢率逐渐升高，各饲粮间差异均显著（*P*<0.05）。随着 NDF/NFC 的降低，消化能、代谢能基本呈升高趋势，饲粮 1 的消化能、代谢能显著低于其他 3 种饲粮（*P*<0.05），但饲粮 2、3、4 之间差异不显著（*P*>0.05）。甲烷能以饲粮 4 最低，显著低于饲粮 1、2（*P*<0.05），其他饲粮之间差异不显著（*P*>0.05）。

表 3 以维持水平饲喂不同 NDF/NFC 饲粮对肉用绵羊能量代谢的影响

Table 3 Effects of feeding different NDF/NFC diets on energy metabolism of meat sheep at maintenance level

	饲粮 Diets					*P* 值 *P*-value	
项目 Items	1	2	3	4	SEM	L	Q

总能摄入量 GEI/（MJ/d）	19.32^{a}	18.12^{b}	16.61^{c}	15.68^{d}	0.07	0.003	0.030
粪能 FE/（MJ/d）	9.26^{a}	7.10^{b}	5.10^{c}	4.22^{d}	0.19	0.015	0.055
尿能 UE/（MJ/d）	0.60^{d}	0.73^{c}	1.00^{b}	1.15^{a}	0.05	0.009	0.134
消化能 DE/（MJ/d）	10.05^{b}	11.02^{a}	11.51^{a}	11.46^{a}	0.13	0.100	0.049
甲烷能 CH_4E/(MJ/d）	1.64^{a}	1.72^{a}	1.53^{ab}	1.42^{b}	0.05	0.043	0.346
代谢能 ME/(MJ/d）	7.99^{b}	8.56^{a}	8.86^{a}	8.88^{a}	0.19	0.076	0.003
总能表观消化率/GE apparent digestibility /%	52.07^{d}	60.78^{c}	69.29^{b}	73.08^{a}	0.01	0.013	0.069
总能代谢率 GE metabolic rate/%	41.35^{d}	46.68^{c}	53.36^{b}	56.63^{a}	0.01	0.008	0.197

2.3 甲烷排放量

由表 4 可以看出，甲烷日排放量随着 NDF/NFC 的降低而降低，饲粮 2 显著高于饲粮 3、4（P<0.05）；饲粮 1 显著高于饲粮 4（P<0.05），但与饲粮 2 差异不显著（P>0.05）。随着 NDF/NFC 的降低，每千克代谢体重的甲烷日排放量逐渐降低，饲粮 2 显著高于饲粮 3 和 4（P<0.05），但与饲粮 1 之间不显著（P>0.05）；每千克 DM 采食量（DMI）的甲烷排放量随 NDF/NFC 的降低先升高后降低，饲粮 1 显著低于饲粮 2、3（P<0.05），但饲粮 2、3、4 之间差异不显著（P>0.05）。以每千克 OM 采食量（OMI）的甲烷排放量计，饲粮 2 显著高于饲粮 1 和 4（P<0.05），但与饲粮 3 差异不显著（P>0.05）。以每千克可消化有机物（DOM）的甲烷排放量计，饲粮 1 显著高于饲粮 3、4（P<0.05），但与饲粮 2 差异不显著（P>0.05）。每千克 NDF 采食量（NDFI）或 ADF 采食量（ADFI）的甲烷排放量随 NDF/NFC 的降低而逐渐升高，各饲粮之间差异均显著（P<0.05）。每千克可消化 NDF（DNDF）或可消化 ADF（DADF）的甲烷排放量也随 NDF/NFC 的降低而升高，饲粮 4 显著高于其他 3 种饲粮（P<0.05），饲粮 2、3 显著高于饲粮 1（P<0.05），但饲粮 2 和 3 之间差异不显著（P>0.05）。甲烷能占总能的比例随着 NDF/NFC 的降低呈先升高后降低的趋势，饲粮 2 显著高于饲粮 1、4（P<0.05），但与饲粮 3 差异不显著（P>0.05）。甲烷能占消化能的比例随 NDF/NFC 的降低而降低，各

饲粮间差异均显著($P<0.05$)。

表 4　以维持水平饲喂不同 NDF/NFC 饲粮对肉用绵羊甲烷排放量的影响

Table 4　Effects of feeding different NDF/NFC diets on methane emission of meat sheep at maintenance level

	饲粮 Diets					*P* 值 *P*-value	
项目 Items	1	2	3	4	SEM	L	Q
甲烷日排放量 CH_4 daily emission/(L/d)	42.10^{ab}	43.43^{a}	38.88^{bc}	35.98^{c}	1.45	0.050	0.290
每千克代谢体重的甲烷日排放量 CH_4 daily emission per kg $BW^{0.75}$/（L/kg $BW^{0.75}$）	2.06^{ab}	2.12^{a}	1.91^{bc}	1.78^{c}	0.12	0.050	0.290
每千克干物质采食量的甲烷排放量 CH_4 emission per kg DMI/（L/kg DMI）	38.00^{b}	42.24^{a}	41.69^{a}	40.92^{ab}	1.66	0.043	0.310
每千克有机物采食量的甲烷排放量 CH_4 emission per kg OMI/（L/kg OMI）	42.00^{b}	46.74^{a}	45.70^{ab}	44.44^{b}	1.82	0.050	0.350
每千克中性洗涤纤维采食量的甲烷排放量 CH_4 emission per kg NDFI/（L/kg NDFI）	61.80^{d}	76.17^{c}	88.71^{b}	108.19^{a}	2.88	0.004	0.058
每千克酸性洗涤纤维采食量的甲烷排放量 CH_4 emission per kg ADFI/（L/kg ADFI）	103.80^{d}	134.46^{c}	151.78^{b}	182.75^{a}	4.89	0.006	0.106
每千克可消化有机物的甲烷排放量 CH_4 emission per kg DOM/（L/kg DOM）	75.00^{a}	73.35^{a}	64.11^{b}	58.78$^{c.}$	2.63	0.020	0.190
每千克可消化中性洗涤纤维的甲	125.70^{c}	141.70^{b}	154.39^{b}	191.95^{a}	7.82		

烷排放量 CH_4 emission per kg DNDF/（L/kg DNDF）						0.033	0.129
每千克可消化酸性洗涤纤维的甲烷排放量 CH_4 emission per kg DADF/（L/kg DADF）	196.80[c]	239.44[b]	245.38[b]	272.17[a]	10.81	0.040	0.238
每兆焦总能采食量的甲烷排放量 CH_4 emission per MJ GEI/（L/MJ GEI）	2.22[b]	2.43[a]	2.33[ab]	2.23[ab]	0.07	0.050	0.534
每兆焦消化能采食量的甲烷排放量 CH_4 emission per MJ DEI/（L/MJ DEI）	4.28[a]	4.01[b]	3.38[c]	3.05[d]	0.14	0.012	0.151
甲烷能 CH_4E/（MJ/d）	1.64[a]	1.72[a]	1.53[ab]	1.42[b]	0.05	0.048	0.346
甲烷能占总能的比例 The ratio of CH_4E to GE/%	8.62[b]	9.47[a]	9.25[ab]	9.06[b]	0.29	0.060	0.392
甲烷能占消化能的比例 The ratio of CH_4E to DE/%	16.60[a]	15.63[b]	13.38[c]	12.42[d]	0.01	0.010	0.171

3 讨 论

3.1 甲烷排放量

反刍动物的甲烷排放量与很多因素有关，包括采食量、饲粮类型、饲粮精粗比以及饲粮的加工方式等，还与动物品种、体重以及瘤胃发酵方式和微生物区系有关[15-17]，其中，饲粮精粗比对甲烷排放量的影响比较大。Aguerre 等[7]研究发现，在自由采食情况下，随着精料比例的升高，奶牛甲烷日排放量逐渐降低；Benchaar 等[18]研究发现，在限饲的情况下，饲喂精粗比分别为 0:100、20:80、50:50、70:30 的饲粮后，奶牛甲烷日排放量随精料比例的升高呈现先升高后降低的趋势，王文奇等[11]、赵一广等[19]也得到相似的结论。饲粮精粗比的不同主要是 NDF/NFC 的不同，本试验中，随着 NDF/NFC 的降低，甲烷日排放量逐渐降低，与 Moss 等[20]、Chandramoni 等[21]的结果一致，这主要有两方面的原因：1）甲烷排放受到

饲粮碳水化合物的影响，随着 NDF 比例的降低，NFC 比例提高，瘤胃的发酵模式由乙酸模式变为丙酸模式[22]，瘤胃 pH 逐渐降低，乙酸与丙酸的比例降低，甲烷生成量逐渐降低；2）饲粮中 NDF 比例降低，则 NFC 比例增加，可改变瘤胃优势菌落，抑制原虫生长，而产甲烷菌附着在原虫的表面，两者互为共生关系，原虫数量减少，则甲烷菌也随着减少，因此甲烷排放量也随之降低[23-25]。

3.2 甲烷排放效率

3.2.1 单位营养物质采食量的甲烷排放量

研究表明甲烷的排放量与 DMI 密切相关[26]。采食量影响饲粮在瘤胃的流通速度及发酵时间，从而影响甲烷排放量[26]。采食量增加，则食糜在瘤胃内停留时间减少，降低营养物质的消化率，则单位 DMI 的甲烷排放量逐渐降低。然而，随着精料比例的升高，饲粮中的 NFC 的比例逐渐升高，可改变瘤胃的发酵模式，因此也能降低单位 DMI 的甲烷排放量。本试验结果表明，随着采食量和 NDF/NFC 的降低，每千克 DMI、OMI 的甲烷排放量先升高后降低，且在 NDF/NFC 为 2.32、1.58 和 1.04 的饲粮间随 NDF/NFC 的降低呈逐渐降低的趋势。本试验结果还表明，每千克 NDFI 或 ADFI 的甲烷排放量随 NDF/NFC 的降低而逐渐升高，而 Aguerre 等[7]发现泌乳奶牛在自由采食的情况下，饲喂 NDF 比例为 47%～63%的饲粮，每千克 DMI、OMI 的甲烷排放量随着 NDF 比例的升高而升高，而每千克 NDFI 的甲烷排放量不受 NDF 比例的显著影响。这与本试验结果不一致，这可能与 NDF、ADF 的消化率有关。谢天宇[16]认为饲粮中 NDF 的比例及消化率影响甲烷排放，主要是因为 NDF 降解产生甲烷的速率高于 NFC[27]，纤维素和半纤维素发酵产生的甲烷量是 NFC 发酵产生的甲烷量的 2～5 倍[28]，瘤胃中可降解纤维量的增加可以增加甲烷的排放。同时，每千克 NDFI 或 DNDF 的甲烷排放量增加可能与食糜在消化道内的滞留时间增加有关，本试验中采食量随着 NDF/NFC 的降低而降低，则食糜的流通速度减慢，食糜在消化道内滞留时间越长，NDF 发酵越充分，甲烷产量相对越高[26]。

Blaxter 等[29]研究表明：在维持水平时，甲烷能占饲粮总能的 7%～9%、占饲粮消化能的 11%～13%。本试验中，在维持水平时，甲烷能占总能的 8%～10%，甲烷能占总能的比例随着 NDF/NFC 的降低呈先升高后降低的趋势。华金玲等[8]以羊草为粗饲料来源，研究不同精粗比饲粮对黄淮白山羊在代谢能 1.2 倍的情况下对甲烷排放的影响，结果表明，甲烷能占总

能的比例随精料比例的增加逐渐减低。Moss 等[20]研究发现，在 1.1 倍维持水平下，随着豆粕添加比例的升高，即精料比例的升高，甲烷能占总能的比例逐渐增大，这与本试验结论不一致，这可能跟饲粮中淀粉的比例有关。本试验采用玉米与豆粕作为精料来源，饲粮中淀粉比例相对较高，则降解产生的丙酸较多，乙酸与丙酸的比例降低，则甲烷排放量减少。

3.2.2 单位可消化营养物质的甲烷排放量

本试验发现，随着 NDF/NFC 的降低，DM、OM、CP、ADF 的表观消化率显著升高（表 2）。由前人建立的回归方程可知：营养物质的消化率与单位有机物的甲烷排放量呈负相关，其中 DOMI 与甲烷产量密切相关[26]。本试验中 OM 的表观消化率从 56%升到 75%（表 4），则甲烷排放量由 74.97 L/kg DOM 降到 58.78 L/kg DOM，甲烷能占消化能的比例从 16.63%降到 12.42%。赵一广等[19]研究发现，饲粮精粗比从 8:92 提高到 64:36 时，每千克 DOM 的甲烷排放量从 48.80 L/DOM 降到 37.83 L/DOM、甲烷能占消化能的比例从 12.27%降到 7.71%。赵明明等[30]也得到类似的结论。这些都与本试验的研究结果相一致，即随着饲粮精料水平的升高，每千克 DOMI 的甲烷排放量逐渐降低。

本试验中，单位 DE 采食量的甲烷排放量、甲烷能占消化能的比例均随饲粮中 NDF 比例的降低而降低。这说明在限饲条件下，降低饲粮中 NDF 比例、提高精饲料比例，可以提高肉用绵羊对 DE 的利用效率。这与王文奇等[11]、刘洁[31]的研究结果一致。在生产上，可以在限饲条件下适当降低 NDF 比例并提高精料比例，以达到提高 DE 利用效率的目的。

4 结 论

① 在维持水平下，随着玉米秸秆饲粮中 NDF/NFC 的降低，肉用绵羊甲烷日排放量和每千克代谢体重的甲烷日排放量逐渐降低，每千克 DOM 的甲烷排放量逐渐减少，每千克 NDF 采食量和每千克可消化 NDF 采食量的甲烷排放量逐渐升高。

② 在维持水平下，随着玉米秸秆饲粮中 NDF/NFC 的降低，肉用绵羊对饲粮中各营养物质的表观消化率逐渐升高

③ 结合饲粮各营养物质表观消化率和甲烷排放效率，在维持水平下，采用 NDF/NFC 为 1.04 的饲粮作为肉用绵羊甲烷减排的饲粮最合适。

参考文献：

[1] 陈丹丹,刁其玉,姜成钢,等.反刍动物甲烷的产生机理和减排技术研究进展[J].中国草食动

物科学,2012,32(5):66–69.

[2] 许贵善,刁其玉,纪守坤,等.不同饲喂水平对肉用绵羊能量与蛋白质消化代谢的影响[J].中国畜牧杂志,2012,48(17):40–44.

[3] DENG K D,DIAO Q Y,JIANG C G,et al.Energy requirements for maintenance and growth of Dorper crossbred ram lambs[J].Livestock Science,2012,150(1/2/3):102–110.

[4] DENG K D,JIANG C G,TU Y,et al.Energy requirements of Dorper crossbred ewe lambs[J].Journal of Animal Science,2014,92(5):2161–2169.

[5] 陈丹丹,刁其玉,姜成钢,等.反刍动物甲烷的产生机理和减排技术研究进展[J].中国草食动物科学,2012,32(4):66–69

[6] HRISTOV A N,OH J,FIRKINS J L,et al.Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: Ⅰ.A review of enteric methane mitigation options[J].Journal of Animal Science,2014,91(11):5045–5069.

[7] AGUERRE M J,WATTIAUX M A,POWELL J M,et al.Effect of forage-to-concentrate ratio in dairy cow diets on emission of methane,carbon dioxide,and ammonia,lactation performance,and manure excretion[J].Journal of Dairy Science,2011,94(6):3081–3093.

[8] 华金玲,王立克,戴四发,等.不同精粗比日粮对黄淮白山羊瘤胃甲烷排放的影响[J].安徽畜牧兽医,2013(1):23–25.

[9] 桑断疾,董红敏,郭同军,等.日粮类型对细毛羊甲烷排放及代谢物碳残留的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):176–181.

[10] 中华人民共和国国家统计局.中华人民共和国国家统计年鉴[EB/OL].[2016-09-01].http://data.stats.gov.cn/search.htm?s=牛羊出栏量 2015.

[11] 王文奇,侯广田,罗永明,等.不同精粗比全混合颗粒饲粮对母羊营养物质表观消化率、氮代谢和能量代谢的影响[J].动物营养学报,2014,26(11):3316–3324.

[12] 赵江波,魏时来,马涛,等.应用套算法估测肉羊精饲料代谢能[J].动物营养学报,2016,28(4):1217–1224.

[13] LEE M H.Official methods of analysis of AOAC international (16th ed):edited by Patricia A.Cunniff,AOAC International,1995.$359.00 (North America)/$399.00 (elsewhere)

(xxvi+1899 pages) ISBN 0 935 584 54 4[J].Trends in Food Science & Technology,1995,6(11):382.

[14] VAN SOEST P J,ROBERTSON J B,LEWIS B A.Methods for dietary fiber,neutral detergent fiber,and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J].Journal of Dairy Science,1991,74(10):3583–3597.

[15] 周怿,刁其玉.反刍动物瘤胃甲烷气体生成的调控[J].草食家畜,2008(4):21–24.

[16] 谢天宇.两种纤维来源日粮对奶牛胃肠道甲烷排放的影响[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.

[17] 娜仁花.不同日粮对奶牛瘤胃甲烷及氮排放的影响研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2010.

[18] BENCHAAR C,POMAR C,CHIQUETTE J.Evaluation of dietary strategies to reduce methane production in ruminants:a modelling approach[J].Canadian Journal of Animal Science,2001,81(4):563–574.

[19] 赵一广,刁其玉,刘洁,等.肉羊甲烷排放测定与模型估测[J].中国农业科学,2012,45(13):2718–2727

[20] MOSS A R,GIVENS D I.The effect of supplementing grass silage with soya bean meal on digestibility,in sacco degradability,rumen fermentation and methane production in sheep[J].Animal Feed Science and Technology,2002,97(3/4):127–143.

[21] CHANDRAMONI S,JADHAO S B,TIWARI C M,et al.Energy metabolism with particular reference to methane production in Muzaffarnagari sheep fed rations varying in roughage to concentrate ratio[J].Animal Feed Science and Technology,2000,83(3/4):287–300.

[22] 李恩凯,杨在宾.反刍动物甲烷的产生、测定及减排调控的研究[J].中国草食动物科学,2014,34(5):64–68.

[23] 韩昊奇.日粮不同 NFC/NDF 比对奶山羊瘤胃细菌种群及有机酸流通的影响[D].硕士学位论文.呼和浩特：内蒙古农业大学,2011.

[24] 卢玉飞,周凌云,赵圣国,等.近 10 年瘤胃微生物分离培养研究进展[J].中国微生态学杂志,2012,24(9):856–861.

[25] 禹爱兵,范忠军,周永康,等.不同碳水化合物结构组成日粮在徐淮白山羊消化道内降解利用的研究[J].安徽农业科学,2012,40(12):7157–7160,7167.

[26] RAMIN M,HUHTANEN P.Development of equations for predicting methane emissions from ruminants[J].Journal of Dairy Science,2013,96(4):2476–2493

[27] KNAPP J R,LAUR G L,VADAS P A,et al.Invited review:enteric methane in dairy cattle production:quantifying the opportunities and impact of reducing emissions[J].Journal of Dairy Science,2014,97(6):3231–3261.

[28] MOE P W,TYRRELL H F.Methane production in dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1979,62(10):1583–1586.

[29] BLAXTER K L,CLAPPERTON J L.Prediction of the amount of methane produced by ruminants[J].The British Journal of Nutrition,1965,19(4):511–522.

[30] 赵明明,杨开伦,邓凯东,等.直接法与替代法测定羊草对肉用绵羊代谢能的比较研究[J].动物营养学报,2016,28(2):436–443.

[31] 刘洁.肉用绵羊饲料代谢能与代谢蛋白质预测模型的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2012.

Effects of Different Neutral Detergent Fiber/Nonfiberous Carbohydrate Diets on Methane Emission of Meat Sheep

DING Jingmei[1,2] DENG Kaidong[3] ZHANG Mingjiao[4] DIAO Qiyu[2] TU Yan[2*] CHENG Shuru[1*]

（1. *College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China;* 2. *Key Laboratory of Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China;* 3. *College of Animal Science, Jinling Institute of Technology, Nanjing* 210038, *China;* 4. *College of Animal Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing* 102206, *China*）

*Correpsonding authors: TU Yan, professor, E-mail: tuyan@caas.cn; CHENG Shuru, associate professor, E-mail: chengsr@gsau.edu.cn (责任编辑 菅景颖)

Abstract: This study investigated the effects of different neutral detergent fiber/nonfiberous carbohydrate (NDF/NFC) diets on methane emission of meat sheep. The trial was conducted according to a 4×4 Latin square design: 16 Dorper×thin tailed *Han* Crossbred wethers were randomly divided into 4 groups with 4 sheep each, and each group was randomly fed one of four total mixed pellet diets (corn stalk as the source of roughage) with the NDF/NFC of 3.02 (diet 1), 2.32 (diet 2), 1.58 (diet 3) and 1.04 (diet 4) at maintenance level, respectively. The trial included 4 periods with each lasted for 18 days, and the first 3 days of each period was an adjustment period, the following 7 days was a pretrial period and the last 8 days was an experimental period. Methane emission and the digestibility of gross energy and nutrients of diets were measured in the experimental period. The results showed that the methane (CH_4) daily emission of sheep fed the diet 2 was significantly higher than that of those fed diets 3 and 4 (43.43 L/d vs. 38.88 and 35.98 L/d; $P<0.05$). Compared with the sheep fed diet 1, the methane emission of per kg dry matter intake (DMI) of sheep fed diets 2 and 3 was significantly increased (38.00 L/kg DMI vs. 42.24 and 41.69 L/kg DMI; $P<0.05$), but no significant difference was observed among sheep fed diets 2, 3 and 4 ($P>0.05$). With the NDF/NFC decrease, the methane emission of per kg digestible organic matter (DOM) was gradually decreased, and sheep fed the diet 4 was significantly lower than sheep fed diets 1, 2 and 3 (58.78 L/kg DOM vs. 75.00, 73.35 and 64.11 L/kg DOM; $P<0.05$）. The methane emissions of neutral detergent fiber intake (NDFI) or acid detergent fiber intake (ADFI) were gradually increased with the NDF/NFC decrease, and the difference among sheep fed four diets was significant ($P<0.05$). In summary, combining with the digestibility of nutrients and methane emission efficiency, the corn stalk diet with NDF/NFC of 1.04 is suited as the formula of methane emission reduction.

Key words: meat sheep; NDF/NFC; methane emission; digestible organic matter